หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีการป้องกันความผิดพร่องลงดิน

การต่อลงดินแต่ละแบบนั้นมีผลกระทบต่อการทำงานของระบบป้องกันความผิดพร่องลงดินโดยตรง โดยปกติแล้วการป้องกันความผิดพร่องลงดินนั้นจะไม่ขึ้นอยู่แค่การเลือกอุปกรณ์ป้องกันและทำการปรับตั้งเท่านั้น สิ่งที่สำคัญคือปรัชญาในการดำเนินการที่เหมาะสม จะต้องพิจารณาถึงความจำเป็นและข้อจำกัดของงานหรือกระบวนการในอุตสาหกรรมนั้นๆ

2.1 ข้อพิจารณาในการทำงานของระบบป้องกันความผิดพร่องลงดิน

เมื่อเกิดความผิดพร่องลงดินขึ้นระบบการป้องกันความผิดพร่องลงดินนั้นสามารถเลือกทำงานได้ 2 อย่าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้และความเหมาะสมของงานนั้นๆได้แก่

1. *ตัดวงจรและกำจัดความผิดพร่องออกจากระบบ (Trip and Clear Fault)*

การเลือกระบบป้องกันที่ทำการตัดวงจรออกทันทีนี้ ส่วนมากจะใช้ในการป้องกันความผิดพร่องลงดินสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องจำนวนมาก ระบบเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นจะมีกระแสผิดพร่องค่าสูงมากและอาจเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับเวลาที่ความผิดพร่องนั้นอยู่ในระบบ ดังนั้นระบบป้องกันจึงไม่สามารถปล่อยให้ความผิดพร่องเกิดต่อไปได้และต้องกำจัดความผิดพร่องออกจากระบบเร็วที่สุด

ระบบการต่อลงดินที่ลักษณะดังกล่าวต้องใช้การป้องกันแบบ ตัดวงจรและกำจัดความผิดพร่องออกจากระบบอันประกอบด้วย

- ระบบต่อลงดินโดยตรง (Solidly Grounded System : SG)
- ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าต่ำ (Low Resistance Grounded System :LRG)

2. *ไม่ตัดวงจรและให้ระบบทำงานต่อเนื่องไปเรื่อยๆ (not to Trip and Maintain Service Continuity)*

ในกรณีแรกนั้นหากระบบป้องกันมีการทำงานแบบตัดวงจรและกำจัดความผิดพร่องออกจากระบบแล้ว จะมีผลทำให้ระบบไม่สามารถดำเนินกระบวนการต่อไปได้ดังเดิมและต้องหยุดทำงานใน

ส่วนที่ระบบป้องกันทำการตัดวงจรออกไป ในงานอุตสาหกรรมบางอย่างนั้นความต่อเนื่องในการทำงาน (Continuity of Service)นั้นมีความสำคัญมากตลอดจนอุตสาหกรรมโดยทั่วไปเมื่อมีการหยุดกระบวนการผลิตจะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นในหลายส่วน จากความจำเป็นดังกล่าวอุตสาหกรรมบางประเภทจึงไม่เหมาะสมที่จะให้ระบบป้องกันทำการตัดวงจร จึงมีการใช้ระบบป้องกันแบบไม่ตัดวงจรและให้ระบบทำงานต่อเนื่องไปเรื่อยๆ โดยเมื่อเกิดความผิดพร่องก็จะทำการส่งสัญญาณเตือน อย่างไรก็ตามการปล่อยให้ระบบทำงานต่อเนื่องไปได้ในขณะมีเหตุผิดพร่องนั้น ระบบจะต้องมีค่ากระแสผิดพร่องต่ำโดยที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้

ระบบการต่อลงดินที่มีลักษณะดังนี้คือ

- ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าสูง (High Resistance Ground System :HRG)
- ระบบไม่ต่อลงดิน (Ungrounded System)

จะเห็นได้ว่ารูปแบบของระบบการป้องกันนั้นจะขึ้นอยู่กับการต่อลงดินแต่การนำระบบการป้องกันมาใช้นั้นจะต้องพิจารณาถึงระบบนั้นๆด้วย โดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระบบต่อลงดินที่ใช้ในระดับแรงดันต่ำและแรงดันปานกลาง [4]

	LV	MV	
System Type	$\leq$ 600 V	2.4 and 4.16 kV	15-33 kV
SG	Trip	Trip[a]	Trip[a]
LRG	Not used	Trip	Trip
HRG	Alarm	Alarm	Not used[b]

[a]SG มักจะไม่ค่อยใช้ในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม

[b]HRG มักไม่ใช้เพื่อให้ระบบดำเนินงานต่อเนื่องเพราะจากประสบการณ์การใช้ระบบต่อลงดินมักไม่ค่อยประสบความสำเร็จในระบบ 13.8 kV

จากตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ($\leq$ 600 V) นั้นปกติมักจะใช้ระบบต่อลงดินโดยตรง (SG) เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถตรวจจับความผิดพร่องได้ง่ายที่สุด เพราะระบบต่อลงดินโดยตรงในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำนั้นจะมีค่ากระแสผิดพร่องไม่สูงนัก นอกจากนี้การใช้ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานสูงก็ยังเป็นระบบต่อลงดินที่เหมาะสมระบบหนึ่งในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ซึ่งปัจจุบันได้มีการใช้มากขึ้นเรื่อยๆ [5],[6]

ในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง ระดับแรงดันไม่สูงมากนัก (เช่นระดับแรงดัน 2.4 ,4.16 kV) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมโดยทั่วไป (แต่ไม่ได้มีการใช้ในระบบไฟฟ้าอุตสาห

กรรมในประเทศไทย) ในระดับแรงดันนี้สามารถใช้ได้ทั้งระบบต่อลงดินโดยตรง (SG) ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าต่ำ (LRG) และระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าสูง (HRG) แต่ระบบต่อลงดินโดยตรงไม่ค่อยนิยมใช้ในระดับแรงดันนี้เพราะค่ากระแสผิดพร่องที่ค่อนข้างสูง ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ระบบไฟฟ้าค่อนข้างมาก ดังนั้นระบบไฟฟ้าในระดับแรงดันนี้จึงนำระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานต่ำเข้ามาใช้มากกว่าเพื่อจำกัดค่ากระแสผิดพร่องที่เกิดขึ้น ส่วนในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานสูงเป็นระบบที่นิยมใช้มากขึ้นเรื่อยๆระบบหนึ่งเช่นกัน

ส่วนระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลางที่มีระดับแรงดันสูง (15-33 kV) ซึ่งระดับแรงดันที่ใช้เป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทย ซึ่งได้แก่ระบบ 22 และ 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และระบบ 24 kV ของการไฟฟ้านครหลวง ในระดับแรงดันนี้ความเสียหายของกระแสผิดพร่องที่มีมากขึ้นทำให้ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าต่ำถูกนำมาใช้เพื่อลดความเสียหายมากขึ้นเป็นผลให้ระบบต่อลงดินโดยตรงในระดับแรงดันนี้ใช้น้อยลงไป แต่สำหรับระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานสูงนั้นมักจะไม่ค่อยประสบความสำเร็จในการใช้ให้ระบบดำเนินงานต่อเนื่องไปเรื่อยๆได้ ด้วยเหตุผล 3 ประการคือ

1. ระบบ HRG มักไม่ค่อยประสบความสำเร็จในระบบ 13.8 kV ดังนั้นระดับแรงดันที่มากกว่า 13.8 kV จึงไม่ค่อยถูกนำมาใช้ [4]

2. สิ่งสำคัญในระบบ HRG คือการตรวจหาจุดผิดพร่อง (Fault Location) เนื่องจากค่ากระแสผิดพร่องที่มีค่าไม่มากนักในระบบ HRG (ไม่เกิน 10 A) การตรวจหาจุดผิดพร่องโดยปกติในระบบ HRG ซึ่งทำได้ค่อนข้างยาก เมื่อระบบมีขนาดใหญ่ขึ้นการตรวจหาจุดผิดพร่องจึงยิ่งทำได้ยากขึ้นไปอีก

การไม่ประสบความสำเร็จในการตรวจหาความผิดพร่องของระบบ HRG เมื่อเกิดความผิดพร่องลงดินขึ้นนั้น จะส่งผลให้เกิดแรงดันขนาด 1.73 เท่าของแรงดันพิกัดสายลงดินบนเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่อง ณ จุดเกิดความผิดพร่องเป็นระยะเวลานานต่อเนื่องกันเป็นผลให้มีโอกาสเกิดความเสียหายที่เฟสอื่นจนเป็นความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงดินซึ่งทำให้เกิดความเสียหายมาก

3. เมื่อใช้ระบบ HRG ต้องออกแบบให้ค่าความต้านทานน้อยรีแอคแทนซ์ของตัวเก็บประจุใน Zero Sequence Network ($R < X_{C0}$) เพื่อให้ค่ากระแสผิดพร่องสูงกว่าค่า Capacitive Current ที่ไหลในระบบเพื่อไม่ให้เกิด Arcing Ground Fault ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังแรงดันปานกลางที่มีระดับแรงดันสูงนั้นจะ มีขนาด Capacitive Current สูง ทำให้ต้องให้ค่าความต้านทานที่จำกัดค่ากระแสผิดพร่องไว้ที่ค่าสูงด้วย ซึ่งค่ากระแสนี้มีค่ามากเกินไปที่ทำให้ระบบดำเนินงานต่อไปได้ [7] เช่น $I_C > 10$ A เป็นผลให้ต้องเลือก $I_R > 15$ A [8] การจำกัดค่ากระแสโดยความต้านทานในระดับนี้จะไม่สามารถให้ระบบดำเนินงานต่อเนื่องได้แล้วทำเพียงแค่ส่งสัญญาณเตือนได้ ต้องทำการทริปสายที่เกิดความผิดพร่องนั้นออกจากระบบ

2.2 การต่อลงดินในระบบไฟฟ้ากำลัง [9]

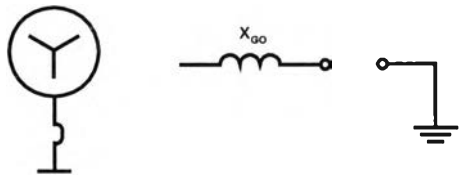
การต่อลงดินในระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถแยกออกเป็นส่วนหลักๆคือ การต่อลงดินโดยตรง (Solid Grounding) และการต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ (Impedance Grounding) โดยที่การต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ นั้นสามารถแยกย่อยออกได้เป็นหลายอย่างเช่น การต่อลงดินผ่านความต้านทาน (Resistance Grounding) การต่อลงดินผ่านรีแอคแทนซ์ (Reactance Grounding) การต่อลงดินแบบเรโซแนนซ์ (Resonance Grounding)

การต่อลงดินแต่ละแบบนั้นหมายถึงลักษณะของวงจรภายนอกที่ต่อจากนิวทรอลลงดิน โดยการต่อลงดินในแต่ละแบบนั้นจะมีวงจรสมมูลเป็นอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกับอิมพีแดนซ์ลงดิน ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลงที่ต่อลงดินโดยตรงอาจเป็นการต่อลงดินอย่างมีประสิทธิผล (Effectively Grounded) หรือไม่ก็ได้ ขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

2.2.1 ระบบไม่มีต่อลงดิน (Ungrounded System)

ระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่มีส่วนที่ตั้งใจทำการต่อลงดินโดยตรงเรียกว่าระบบไม่ต่อลงดิน โดยปกติระบบนี้ก็คือการต่อลงดินผ่านตัวเก็บประจุ (Capacitive Grounding) ซึ่งโดยปกติจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมากจนแยกระบบของนิวทรอลกับดินออกจากกัน

ประโยชน์หลักของระบบที่ไม่มีการต่อลงดินคือ เมื่อเกิดความผิดพร่องลงดินจะทำให้เกิดกระแสผิดพร่องค่าต่ำ ทำให้สามารถเดินเครื่องจักรต่อไปได้ อีกส่วนหนึ่งก็คือไม่ต้องลงทุนทำการต่อลงดิน แต่ในระบบที่มีการต่อลงดินนั้นมีประโยชน์มากกว่าหลายประการคือ เป็นระบบที่มีความปลอดภัยมากกว่าสำหรับการเกิดแรงดันเกินในระบบเมื่อเกิดความผิดพร่องที่มีอาร์ค และความผิดพร่องเรโซแนนซ์หรือใกล้เรโซแนนซ์ซึ่งเกิดได้ง่ายในระบบไม่ต่อลงดิน นอกจากนี้ยังสามารถหาจุดที่เกิดความผิดพร่องได้ง่ายเพื่อทำการแก้ไขซ่อมแซม

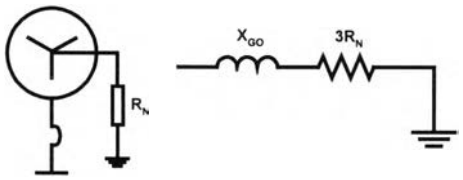


เมื่อ X_{G0} คือ รีแอคแทนซ์ลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลง

รูปที่ 2.1 ระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน

2.2.2 ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน (Resistance Grounded System)

เป็นระบบที่มีการต่อลงดินจากจุดนิวทรอลผ่านความต้านทานลงดิน โดยแรงดันที่เฟสต่างๆ ขณะเกิดความผิดพร่องนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับระบบที่ไม่มีการต่อลงดินยกเว้นแรงดันเกินชั่วครู่ (Transient Overvoltage) ที่เกิดจะน้อยกว่า แต่การต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้นการยับยั้งแรงดันเกินชั่วครู่ไม่ใช่จุดประสงค์หลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีแรงดันต่ำกว่า 15 kV แล้ว เมื่อมีการออกแบบให้ $R_0 \leq X_{C0}$ ($R_0=3R_N$) ปัญหาแรงดันเกินชั่วครู่จะน้อยลงไป



เมื่อ X_{G0} คือ รีแอคแทนซ์ลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลง
R_N คือ ความต้านทานที่ใช้ในการต่อลงดิน

รูปที่ 2.2 ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน

โดยปกติแล้วการต่อลงดินผ่านความต้านทานจะนำมาใช้เพื่อทำการจำกัดกระแสผิดพร่อง ซึ่งใช้มากในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าต่ำ (Low Resistance Grounding) และเป็นข้อกำหนดอยู่ในระบบการต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าสูง (High Resistance Grounding) เพื่อจุดประสงค์ต่างๆ ดังนี้

1. เพื่อลดความเสียหายที่เกิดจากการเผาไหม้หรือการหลอมละลายของอุปกรณ์ไฟฟ้าในขณะเกิดความผิดพร่อง เช่น สวิตซ์เกียร์ หม้อแปลง เคเบิล เครื่องจักรหมุนต่างๆ
2. เพื่อลดความเครียดเชิงกลในการทนกระแสผิดพร่อง
3. เพื่อลดอันตรายที่เกิดขึ้นกับมนุษย์
4. เพื่อลดค่าแรงดันตกผิดปกติ (Voltage Dip) ที่เกิดขึ้นในระบบขณะเกิดความผิดพร่องและขณะกำจัดความผิดพร่อง
5. ในระบบการต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าสูงจะสามารถให้ระบบทำงานต่อไปได้เมื่อเกิดความผิดพร่องครั้งแรก

ระบบการต่อลงดินผ่านความต้านทานสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภทคือ

- ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าต่ำ
- ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าสูง

การแบ่งการต่อลงดินผ่านความต้านทานแบบนี้จะแยกตามค่ากระแสผิดพร่องลงดินที่ความต้านทานนั้นจำกัดไว้แม้ว่าจะไม่ได้มีมาตรฐานที่กำหนดระดับกระแสสำหรับระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานนี้ไว้ แต่โดยปกติมีการใช้ดังนี้คือ ระบบต่อลงดินความต้านทานสูงจะจำกัดค่ากระแสผิดพร่องให้อยู่ในระดับน้อยกว่า 10 A และระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานต่ำจะให้มีกระแสผิดพร่องอย่างน้อยที่สุด 100 A และจำกัดค่าประแสผิดพร่องอยู่ในช่วง 200-2000 A

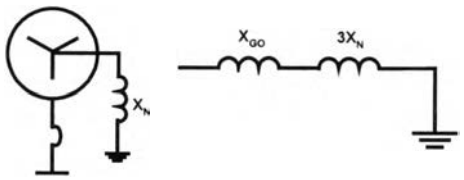
การต่อลงดินผ่านความต้านทานทั้ง 2 ชนิดนี้จะสามารถจำกัดค่าแรงดันเกินชั่วครู่ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยได้ (250% ของแรงดันพิกัด) ระบบการต่อลงดินผ่านความต้านทานสูงนี้ ปกติจะไม่ทำการตัดวงจรทันทีเมื่อเกิดความผิดพร่องเพราะกระแสผิดพร่องมีค่าต่ำมาก โดยจะให้กระแสมีค่าอย่างน้อยเท่ากับค่ากระแสอัดประจุ (Charging Current)ของระบบ และจะให้ระบบป้องกันทำการส่งสัญญาณเตือนมากกว่าทำการทริปออกจากระบบ ส่วนใหญ่จะหลีกเลี่ยงการออกแบบระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานสูงที่มีค่ามากกว่า 10 A เนื่องจากจะเกิดความเสียหายจากกระแสอาร์คที่มากเกินไป

ระบบการต่อลงดินผ่านความต้านทานต่ำจะสามารถทำการกำจัดความผิดพร่องได้ แต่จำเป็นต้องให้ค่ากระแสผิดพร่องน้อยสุดของระบบเพียงพอต่อการทำงานของรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน

ระบบการต่อลงดินผ่านความต้านทานต้องการกับดักเสิร์จ (Surge Arrester) ที่เหมาะสม พิกัดของกับดักเสิร์จแบบ MOV ต้องเลือกไม่ให้เกินค่า MCOV (Maximum Continuous Operating Voltage) และ ค่าแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) ใน 1 วินาทีแรกเมื่อเกิดความผิดพร่อง

2.2.3 ระบบต่อลงดินแบบรีแอคแทนซ์ (Reactance Grounded System)

การต่อลงดินแบบรีแอคแตนซ์นั้นคือการต่อลงดินผ่านรีแอคเตอร์จากนิวทรอลลงดินโดยปกตินั้นจะใช้การต่อลงดินแบบรีแอคแตนซ์เพื่อจำกัดกระแสผิดพร่องให้อยู่ในช่วง 25 – 60 % ของกระแสผิดพร่องลงดินแบบ 3 เฟส การใช้ระบบต่อลงดินแบบรีแอคแทนซ์นั้นจะจำกัดค่ากระแสผิดพร่องให้มีค่าสูงกว่าค่ากระแสผิดพร่องลงดินในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานมาก ดังนั้นจะไม่ทำการออกแบบให้ระบบต่อลงดินสามารถเลือกใช้ได้ทั้งสองระบบเพราะจะมีผลกระทบต่อระบบป้องกันส่วนอื่นๆ



เมื่อ X_{G0} คือ รีแอคแทนซ์ลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลง

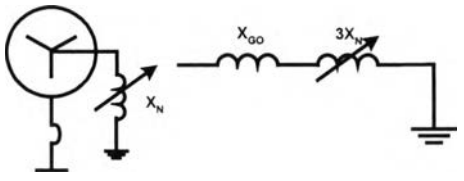
X_N คือ รีแอคเตอร์ที่ใช้ในการต่อลงดิน

รูปที่ 2.3 ระบบต่อลงดินผ่านรีแอคแทนซ์

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่วนมากที่ทำการต่อลงดินแบบโดยตรงซึ่งไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่อกับวงจรลำดับศูนย์ (Zero Sequence Network) ของระบบ จะทำให้ค่ากระแสผิดพร่องลงดินสูงสุดนั้นมีค่าเกินค่ากระแสผิดพร่องแบบ 3 เฟสซึ่งทำให้เกิดความเสียหายแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้ทำการต่อลงดินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านรีแอคแทนซ์ค่าต่ำเพื่อจำกัดค่ากระแสสูงสุดไม่ให้มีค่าเกินค่ากระแสผิดพร่องแบบ 3 เฟส เช่นกรณีของระบบไฟฟ้าแบบสามเฟสสี่สายนั้นการจำกัดค่ากระแสผิดพร่องลงดินให้มีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสผิดพร่องแบบ 3 เฟส จะทำให้ระบบไม่ถูกรบกวนมากนัก การใช้ระบบต่อลงดินแบบรีแอคแทนซ์โดยปกติอาจใช้ต่อลงดินหม้อแปลงในสถานีจ่ายไฟย่อยด้วยเหตุผลดังกล่าวได้

2.2.4 ระบบต่อลงดินแบบเรโซแนนซ์ (Resonant Grounded System)

การต่อลงดินแบบนี้ทำได้โดยติดตั้งตัวหักล้างความผิดพร่องลงดิน(Ground-fault Neutralizer) ซึ่งเป็นรีแอคเตอร์ต่อระหว่างนิวทรอลและดิน โดยค่ารีแอคแทนซ์จะถูกทำการปรับค่าเทียบกับกระแส



เมื่อ X_{G0} คือ Zero-sequence Reactance ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลง

X_N คือ รีแอคเตอร์ปรับค่าได้ที่ใช้ในการต่อลงดินแบบเรโซแนนซ์

รูปที่ 2.4 ระบบต่อลงดินแบบเรโซแนนซ์

อัดประจุ (Charging Current) ของระบบเพื่อให้กระแสผิดพร่องเป็น Resistive และมีค่าต่ำ ค่ากระแสผิดพร่องนี้จะมีเฟสตรงกันกับแรงดันระหว่างสายกับนิวทรอล (Line-to-neutral Voltage) เพื่อให้กระแสและแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ในเวลาเดียวกัน

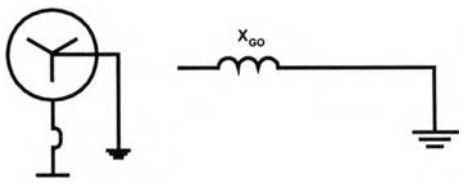
โดยปกติการต่อลงดินแบบนี้จะใช้ในระบบที่มีแรงดันสูงกว่า 15 kV ซึ่งมีระบบส่งขนาดใหญ่ดังนั้นจึงไม่ค่อยถูกใช้ในงานไฟฟ้าในอุตสาหกรรม

2.2.5 ระบบต่อลงดินโดยตรง (Solidly Grounded System)

เนื่องจากค่ารีแอคแทนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลงนั้นจะต่ออนุกรมกับค่าอิมพีแดนซ์จากนิวทรอลลงดิน แต่สำหรับระบบต่อลงดินโดยตรงนั้นจะไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่ส่วนวงจรนิวทรอล ซึ่งถ้าค่ารีแอคแทนซ์ลำดับศูนย์ของระบบเมื่อเทียบกับค่ารีแอคแทนซ์ลำดับบวกของระบบมีค่ามากเกินไปจะไม่สามารถควบคุมการเกิดแรงดันเกินชั่วครู่ได้ แต่โดยปกติค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงวาย-เดลตา(Wye – Delta)จะมีค่าไม่เกินอิมพีแดนซ์ลำดับบวก อย่างไรก็ตามอาจมีกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์เกินค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกเกิดขึ้นได้ เช่นในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลงขนานกันหลายเครื่องแต่มีเพียงเครื่องเดียวที่มีการต่อลงดินก็จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์นั้นมากกว่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกได้ หรือในกรณีที่มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่ระยะไกลมาก ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าเข้าใกล้ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของสายส่งนั้น

เพื่อที่จะได้ประโยชน์จากระบบต่อลงดินโดยตรงจำเป็นต้องหาค่าการต่อลงดินที่แน่นอน สิ่งที่บ่งชี้ได้ก็คือกระแสผิดพร่องลงดินเทียบกับกระแสผิดพร่อง 3 เฟส ดังนี้

การต่อลงดินอย่างมีประสิทธิผล (Effectively Grounded) จะมีค่าความผิดพร่องลงดินเฟสเดียวลงดิน (Single Line-to-ground Fault) เป็น 60 % ของความผิดพร่องแบบ 3 เฟส



เมื่อ X_{G0} คือ รีแอคแทนซ์ลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลง

รูปที่ 2.5 ระบบต่อลงดินโดยตรง

ตามมาตรฐานการต่อลงดินของ IEEE สามารถแบ่งระบบการต่อลงดินตามค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวกได้ดังตาราง

ตารางที่ 2.2 การแบ่งชนิดการต่อลงดิน [3]

Grounding Classes and Means	X_0/X_1	R_0/X_1	R_0/X_0	%Fault Current	PU. Transient LG Voltage
A. Effectively					
1. Effective	0-3	0-1	-	> 60	$\leq$ 2.0
2. Very effective	0-1	0-0.1	-	> 95	< 1.5
B. Non effectively					
1. Inductance					
a. Low Inductance	3-10	0-1	-	> 25	< 2.3
b. High Inductance	> 10	-	< 2	< 25	$\leq$ 2.73
2. Resistance					
a. Low Resistance	0-10	-	$\geq$ 2	< 25	< 2.5
b. High Resistance	-	>100	$\leq$ (-1)	< 1	$\leq$ 2.73

คอลัมน์ที่ 2-4 คือค่าอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวก

โดย R_0 คือค่าความต้านทานลำดับศูนย์

X_0 คือค่ารีแอคแทนซ์ลำดับศูนย์

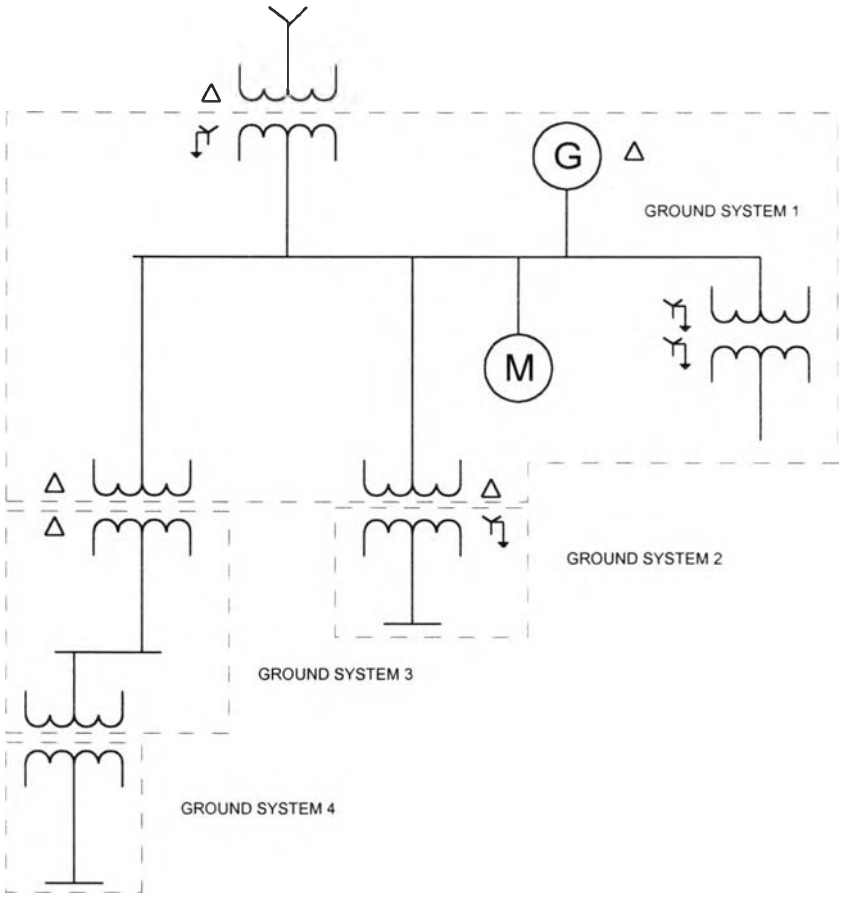
X_1 คือค่ารีแอคแทนซ์ลำดับบวก

คอลัมน์ที่ 5 คือค่าเปอร์เซ็นต์ของระบบต่อลงดินแต่ละประเภทเทียบกับกระแสผิดพร่องแบบสามเฟส

คอลัมน์ที่ 6 คือค่า pu. ของแรงดันเกินชั่วครู่เทียบกับค่ายอดของแรงดันระหว่างเฟสกับดินก่อนเกิดความผิดพร่อง

2.3 จุดประสงค์ของการต่อลงดิน

ระบบการต่อลงดิน คือระบบที่เจตนาต่ออิมพีแดนซ์ระหว่างเฟสหรือนิวทรอลลงดิน เพื่อต้องการควบคุมค่ากระแสและแรงดันเมื่อเกิดความผิดพร่องให้อยู่ในช่วงที่ทำการคาดคะเนไว้ล่วงหน้า โดยระบบป้องกันยังสามารถตรวจจับค่ากระแสผิดพร่องที่ไหล ซึ่งเป็นผลให้อุปกรณ์ป้องกันทำการตัดวงจรเฉพาะส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าในส่วนของการต่อลงดินนั้นดังรูป



รูปที่ 2.6 บริเวณที่ถูกควบคุมโดยการต่อลงดินที่ต่างกัน

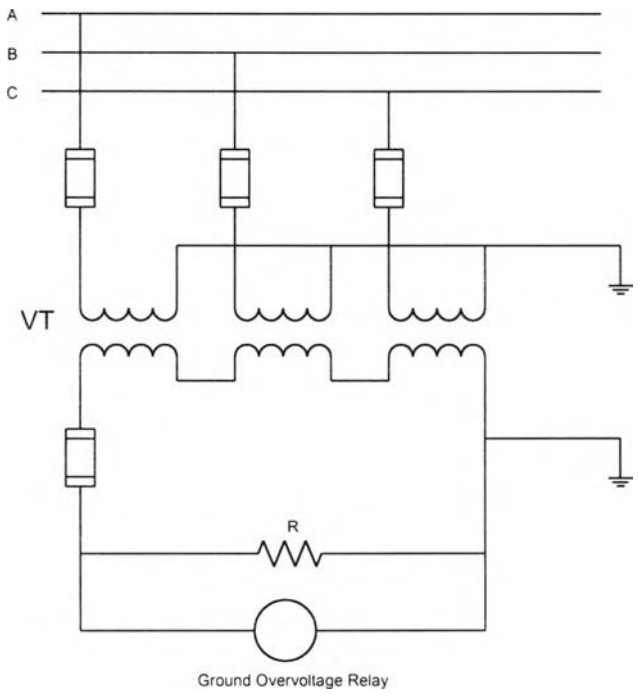
นอกจากนี้การควบคุมแรงดันระหว่างเฟสลงดินนั้นยังสามารถกำจัดความเครียดที่จะเกิดขึ้นกับฉนวนไฟฟ้าของสายไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าได้และยังสามารถลดความรุนแรงทางไฟฟ้าที่เกิดกับมนุษย์ได้ด้วย

2.4 การป้องกันความผิดพร่องลงดินในระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังแรงดันปานกลาง

วิธีที่ใช้ในการตรวจจับกระแสผิดพร่องลงดินในระบบไฟฟ้ากำลังแรงดันปานกลางตรวจจับได้จากค่าต่างๆหลายวิธี เช่น การตรวจวัดแรงดัน(Voltage Detection) การตรวจวัดค่ากระแสตกค้าง (Residual Connection) การตรวจวัดวงจรลำดับศูนย์ (Core Balance) การตรวจวัดค่ากระแสลงดิน (Ground Return) และการตรวจวัดกระแสนิวทรอล(Neutral Ralaying) มีรายละเอียดดังนี้ [10],[11]

2.4.1 การป้องกันแบบตรวจวัดแรงดัน (Voltage Detection)

การตรวจวัดแรงดันเป็นการตรวจจับความผิดพร่องลงดินที่ดีที่สุด เนื่องจากสามารถตรวจจับได้เมื่อค่ากระแสผิดพร่องมีค่าต่ำและโดยปกติจะมีค่าเปลี่ยนแปลงต่อตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องน้อย อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันจะใช้ในส่วนของแรงดันต่ำและใช้หม้อแปลงแรงดันเพื่อต่อกับส่วนของแรงดันปานกลางดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การป้องกันแบบตรวจวัดแรงดัน

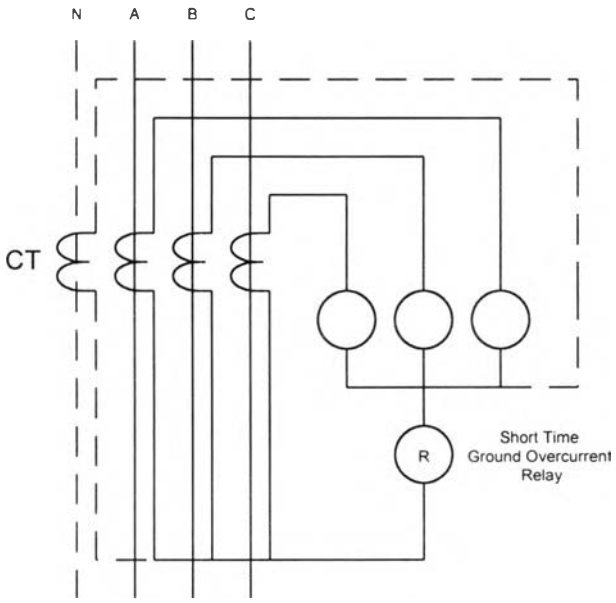
วิธีนี้สามารถบ่งบอกว่ามีความผิดพร่องลงดินเกิดขึ้นแต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องลงดินได้ โดยมากจะใช้หม้อแปลงกระแส Wye ground Broken Delta โดยมีค่าความต้านทาน

ต่อเพื่อลดการเลื่อนมุมของจุดนิวทรอลจากผลของหม้อแปลงแรงดันและลดผลของการเกิด เฟอร์โรเรโซแนนซ์ (Ferroresonance) จากค่ารีแอคแทนซ์ของตัวเหนี่ยวนำในหม้อแปลงแรงดันและรีเลย์แรงดัน (Voltage Relay) กับค่าตัวเก็บประจุของระบบ

ค่าแรงดันที่ใช้เพื่อให้รีเลย์ทำงานสำหรับความผิดพร่องแบบเฟสลงดินของระบบที่ไม่ต่อลงดินจะเป็น 3 เท่าของแรงดันระหว่างเฟสลงดิน เช่น ในระบบ 13.8 kV อัตราส่วนของหม้อแปลงแรงดันจะมีค่า V_{LN}/69.3 V ดังนั้น แรงดันสูงสุดที่ใช้ในระบบต่อลงดินโดยตรงจะเป็น 3×69.3=208 V เนื่องจากรีเลย์ที่ใช้จะเป็นระบบที่ทำการส่งสัญญาณเตือนเท่านั้น พิกัดแรงดันต่อเนื่อง (Continuous Voltage Rating) จึงควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า 208 V นี้ [10],[12]

2.4.2 การป้องกันแบบตรวจวัดกระแสตกค้าง (Residual Connection)

ในระบบแรงดันต่ำ หลักการทำงานนี้จะใช้หลักการของผลรวมเวกเตอร์ของกระแสเฟสในระบบที่สมดุลนั้นมีค่าเป็นศูนย์ ถ้าหม้อแปลงกระแสสามารถแปลงค่ากระแสจากด้านปฐมภูมิมายังด้านทุติยภูมิได้ถูกต้อง ปริมาณกระแสรวมทางด้านทุติยภูมิจะมีค่ารวมกันได้ศูนย์ ดังนั้นรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินที่ต่อแบบ Residual นั้นจะทำการตรวจวัดความผิดพร่องลงดินตลอดการทำงานของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 การป้องกันแบบตรวจวัดกระแสตกค้าง

การใช้วิธีการตรวจจับความผิดพร่องแบบนี้มีข้อกำหนด 2 ข้อดังนี้คือ

1. ความไว (Sensitivity) มีผลอย่างมากต่อค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส ซึ่งทำการเลือกจากค่ากระแสผิดพร่องที่มีค่ามาก ดังนั้นความไวในการตรวจจับความผิดพร่องลงดินจึงแย่ลงเมื่อค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสนั้นมากขึ้น

2. ค่ากระแสที่ไม่ถูกต้องจากการแปลงค่ากระแสเนื่องจากผลของความแตกต่างของคุณสมบัติหม้อแปลงวัดกระแสที่แต่ละเฟสเพียงเล็กน้อยเป็นสาเหตุให้ผลรวมของค่ากระแสในด้านทุติยภูมินั้นไม่เป็นศูนย์แม้ว่าด้านปฐมภูมิจะเป็นศูนย์ก็ตาม ลักษณะสมบัตินี้จะเกิดปัญหาขึ้นในกรณีเมื่อเกิดกระแสพุ่ง (Inrush Current) หรือกระแสผิดพร่องที่มีส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) ในช่วงกาวะชั่วแวบ(Sub-transient) ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงกระแสเหล่านี้จะลดลงไปอย่างรวดเร็วในไม่กี่ไซเคิล แต่ในบางครั้งอาจจะไม่เร็วพอที่อุปกรณ์ป้องกันไม่ทำงาน ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้ รีเลย์แบบฉับพลัน(Instantaneous) และใช้รีเลย์กระแสเกินแบบเวลาแทน

สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสามสายนั้น ต้องการหม้อแปลงกระแสเพียงสามตัวเท่านั้น แต่ในระบบไฟฟ้าแบบสามเฟสสี่สายนั้น ต้องการหม้อแปลงกระแสสี่ตัว เพื่อที่จะสามารถป้องกันผลของค่ากระแสตกค้าง (Residual Current) ต่อผลของความไม่สมดุลของกระแสโหลด ดังนั้นหม้อแปลงวัดกระแสตัวที่สี่นั้นควรจะทำการตั้งระดับการทำงาน (Pickup Level) ให้อยู่ในระดับที่เกินค่าความไม่สมดุลของโหลดที่คาดว่าจะเกิดขึ้น เมื่อคิดในกรณีที่แย่สุดของกระแสที่เกิดจากความไม่สมดุลของกระแสโหลดนั้นมีค่าต่ำกว่าค่าปรับตั้งแล้วก็สามารถนำมาใช้งานได้

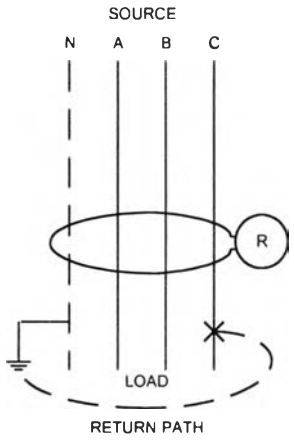
รีเลย์กระแสเกินที่ใช้สำหรับการป้องกันความผิดพร่องลงดินนั้นโดยทั่วไปจะเหมือนกับรีเลย์ที่ใช้ในการป้องกันความผิดพร่องแบบเฟส แต่จะมีความแตกต่างที่รีเลย์ที่ใช้ในการป้องกันความผิดพร่องลงดินนั้นจะมีความไวมากกว่าคือสามารถปรับตั้งค่ากระแสให้รีเลย์ทำงานค่าต่ำได้เนื่องจากรีเลย์จะทำงานเมื่อเกิดความผิดพร่องลงดินเท่านั้น สิ่งนี้เองเป็นข้อรบกวนในการทำงานเนื่องจากความผิดพลาดของกระแสที่วัดจากหม้อแปลงกระแสนี้สูงขึ้นจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสนั้น นอกจากนี้ยังไม่สามารถนำไปใช้ต่อเข้ากันกับรีเลย์แบบผลต่าง (Differential Relay) ได้ ดังนั้นความไวของรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินจึงมีขอบเขตจากข้อจำกัดดังกล่าว

2.4.3 การป้องกันแบบตรวจวัดวงจรลำดับศูนย์ (Core Balance)

วิธีการตรวจวัดความผิดพร่องแบบนี้จะขึ้นอยู่กับผลรวมของกระแสทางด้านปฐมภูมิหรือผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้านปฐมภูมิโดยตรง แล้วจึงค่อยแปลงไปยังด้านทุติยภูมิ วิธีการ

ตรวจจับความผิดพร่องแบบ Core Balance นั้นใช้อย่างมากในระบบแรงดันต่ำ อาจมีการเรียกการตรวจวัดแบบนี้ว่า Zero-sequence Sensor หรือ Window Current Transformer แต่การเรียกแบบ Core Balance เป็นที่นิยมมากกว่า

หลักการการตรวจวัดวงจรลำดับศูนย์ทำได้ดังรูปที่ 2.9



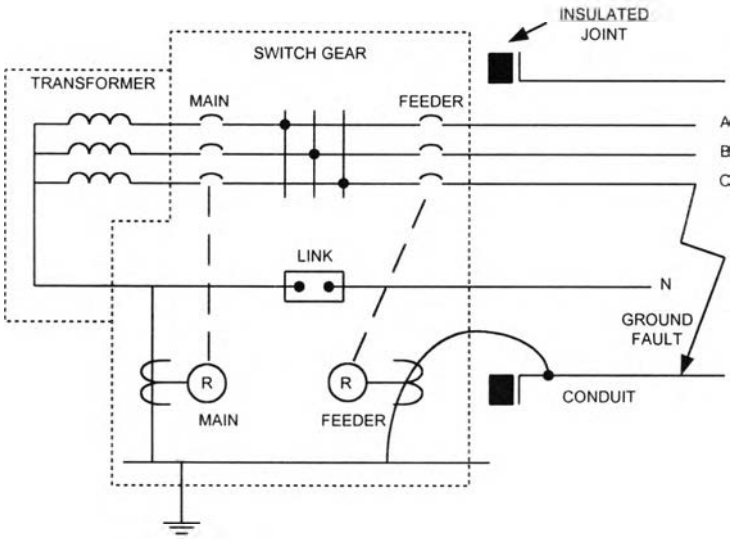
รูปที่ 2.9 การป้องกันแบบตรวจวัดวงจรลำดับศูนย์

คือ มีสายตัวนำล้อมรอบสายเฟสซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนแม่เหล็ก (Magnetic Core) ในสภาวะปกตินั้นกระแสที่ไหลออกและไหลกลับนั้นจะผ่านสายที่คล้องอยู่ ฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิจะมีผลรวมเป็นศูนย์ ไม่มีกระแสไหลผ่านไปยังรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน แต่เมื่อความผิดพร่องเกิดขึ้น กระแสผิดพร่องนั้นจะไหลผ่านวงจรส่วนที่ต่อลงดิน (ซึ่งอาจจะไหลผ่านส่วนต่อลงดินอื่นๆ) ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จึงเป็นอัตราส่วนตามกระแสผิดพร่องลงดิน และมีกระแสไหลในวงจรของรีเลย์ รีเลย์ที่มีการต่อแบบ Core Balance นั้นจะมีความไวค่อนข้างสูง อย่างไรก็ดีควรคำนึงความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแสของความผิดพร่องที่ไม่ลงดินด้วย

2.4.4 การป้องกันแบบตรวจวัดค่ากระแสลงดิน (Ground Return)

การตรวจจับความผิดพร่องลงดินแบบตรวจวัดค่ากระแสลงดินนั้นจะใช้กับหม้อแปลงหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องมาจากปัญหาของระบบที่มีการต่อลงดินหลายจุด ซึ่งวิธีนี้ในสภาวะปกติกระแสโหลดจะไม่ย้อนกลับสู่แหล่งกำเนิดแต่อย่างใด จะมีก็แต่กระแสผิดพร่องเท่านั้นที่ย้อนกลับสู่จุดต่อลงดินที่แหล่งกำเนิด โดยการตรวจจับวิธีนี้จะให้กระแสผิดพร่องไหลผ่านหม้อแปลง

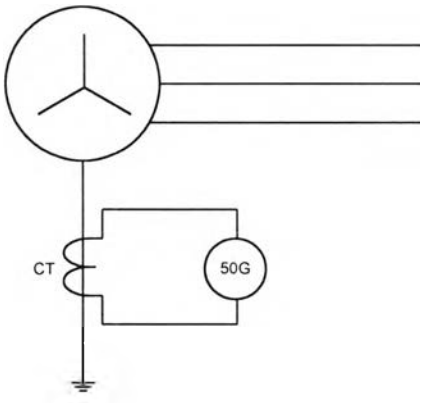
กระแสที่ต่อระหว่างจุดนิวทรอลและกราวน์ สำหรับวงจรป้องกันสายป้อนต้องมีฉนวนเชื่อมกับท่อโลหะและมีสายต่อเชื่อมข้ามจากท่อโลหะมายังจุดกราวน์ เพื่อสามารถตรวจจับความผิดพร่องลงดิน วิธีนี้ปกติจะไม่แนะนำให้ใช้เนื่องจากการติดตั้งฉนวนระหว่างจุดเชื่อมต่อทำได้ยาก



รูปที่ 2.10 การป้องกันแบบตรวจวัดค่ากระแสลงดิน

2.4.5 การป้องกันแบบตรวจวัดกระแสนิวทรอล(Neutral Relaying)

การใช้นิวทรอลรีเลย์นั้นจะทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงกระแสระหว่างนิวทรอลและกราวน์ของหม้อแปลงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกต่อการใช้งาน มีราคาต่ำในการตรวจจับความผิดพร่องลงดิน โดยมีเพียงกระแสผิดพร่องลงดินเท่านั้นที่ไหลผ่านรีเลย์ โดยสามารถปรับตั้งให้รีเลย์ทำงานที่กระแสค่าต่ำมากได้

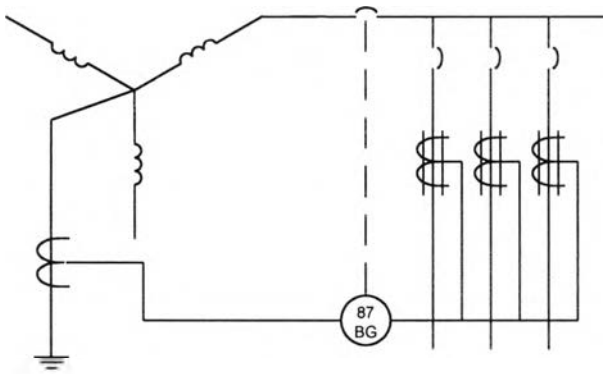


รูปที่ 2.11 การป้องกันแบบตรวจวัดกระแสนิวทรอล

ปกติจะใช้วิธีนี้ในระดับแรงดัน 5 kV-15 kV ซึ่งระบบที่มักจะใช้เป็นระบบที่มีการต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าต่ำ โดยมีค่ากระแสผิดพร่องต่ำได้ถึง 200 A และสามารถทำการเลือกทำงานกับรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินของสายป้อนได้

2.4.6 การป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบผลต่าง (Ground Differential Relay)

วิธีการป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบผลต่างนี้มาจากการประยุกต์ใช้การป้องกันข้างต้นรวมกันอีกทีหนึ่ง โดยรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบผลต่างนี้เหมาะสำหรับใช้ในงานป้องกันความผิดพร่องลงดินที่บัส



รูปที่ 2.12 การป้องกันแบบผลต่าง

จากรูปหม้อแปลงกระแสแบบ Core Balance ติดตั้งอยู่กับด้านสายป้อนขาออก (Outgoing Feeder) ทุกๆสายป้อน และใช้หม้อแปลงกระแสอีกตัวต่อระหว่างนิวทรอลและกราวน์ของหม้อแปลง วิธีนี้เป็นวิธีป้องกันที่มีความไว (Sensitivity) ดีมาก เหมาะอย่างยิ่งสำหรับระบบที่มีค่ากระแสผิดพร่องลงดินน้อยๆ ข้อควรระวังของวิธีนี้คือจะต้องใช้หม้อแปลงกระแสแต่ละตัวที่มีอัตราส่วนเหมาะสมให้ค่ากระแสเท่ากันพอดี เพื่อไม่ให้เกิดทริปเมื่อเกิดความผิดพร่องนอกเขตป้องกัน (Zone of Protection)